УДК 556.314

ГЕОХИМИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД АКАДЕМИЧЕСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Е.М. Дутова, Д.С. Покровский*

Томский политехнический университет
E-mail: emdutova@mail.ru
*Томский архитектурно-строительный университет
E-mail: lls@tgasa.tomsk.ru

Приведены результаты изучения геохимии подземных вод Академического месторождения, использующегося для хозяйственно-питьевого водоснабжения крупного жилого района города Томска. Приводятся данные об изменении гидрогеохимических показателей в процессе эксплуатации месторождения. Установлено устойчивое во времени повышение в подземных водах величин сульфат-иона и общей жесткости, при одновременном уменьшении концентраций растворенных форм миграции железа. Ведущим фактором этих изменений выступает аэрация недр в условиях нарушенного гидродинамического режима при длительной эксплуатации. Прослеживается изменение гидрогеохимических показателей в технологическом процессе водоподготовки и последующей транспортировке воды потребителю.

Введение

Данная статья направлена на изучение изменчивости гидрогеохимических сред объектов водоснабжения – одного из самых распространенных видов человеческой деятельности. Выявление закономерностей и механизмов формирования состава вод в этих условиях представляет несомненный интерес как с теоретических, так и с прикладных позиций.

В качестве объекта исследований выбрано Академическое месторождение, являющееся типичным примером эксплуатации вод трещинных коллекторов в низкогорных условиях Алтае-Саянской складчатой области. Фактической основой работы послужили материалы мониторинговых исследований, выполняющихся службами водозабора.

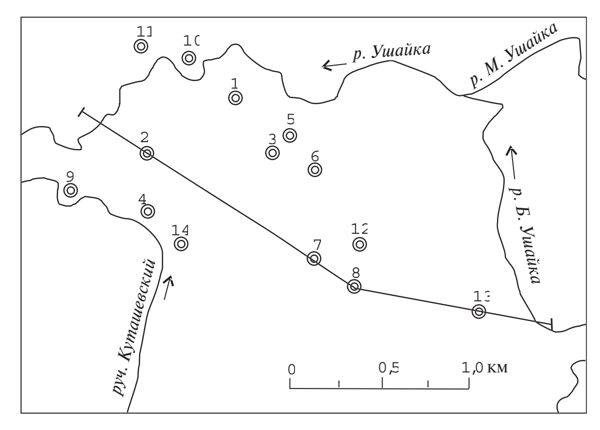
Общая характеристика объекта исследований

Академическое месторождение подземных вод в геолого-структурном отношении расположено в пределах Колывань-Томской складчатой зоны. Водовмещающие палеозойские породы, представленные песчаниками, глинистыми сланцами, аргиллитами и алевролитами и содержащие дайки пермо-триасового возраста, наиболее обводнены в пределах зоны экзогенной трещиноватости, особенно вдоль тектонических нарушений и сопутствующих им зон дробления.

Одноименный водозабор эксплуатируется с 1974 г. и обеспечивает хозяйственно-питьевое водоснабжение крупного жилого массива г. Томска. Он расположен восточнее городской территории на левобережье р. Ушайки и представляет собой площадную систему, содержащую в настоящее время 13 скважин с расстояниями от 250 до 500 м между ними (рис. 1). Скважины глубиной 80...110 м оборудованы фильтрами с проволочной обмоткой, располагающимися в пределах глубин 14...80 м, и погружными насосами, установленными в интервалах 40...80 м от дневной поверхности. Производительность эксплуатационных скважин колеблется от 100 до 900, а водозабора в целом – от 2380 до 3165 при среднегодовых значениях 2560 $м^3$/сут.

Обводнены, но в различной степени, все разности пород. Наиболее водообильна верхняя часть комплекса в пределах зоны экзогенной трещиноватости, особенно вдоль тектонических нарушений и сопутствующих им зон дробления. Эффективная

мощность пород комплекса изменяется от 9 до 85 м. Водообильность их чрезвычайно неравномерна и по параметрам (коэффициенты водопроводимости, расходы, удельные дебиты скважин) отличается на отдельных участках на два порядка. В пределах наиболее водообильных участков, выявленных при разведке, производительность скважин изменяется от 5,7 до 23,0 л/с при удельных дебитах от 0,3 до 2,1 л/с.



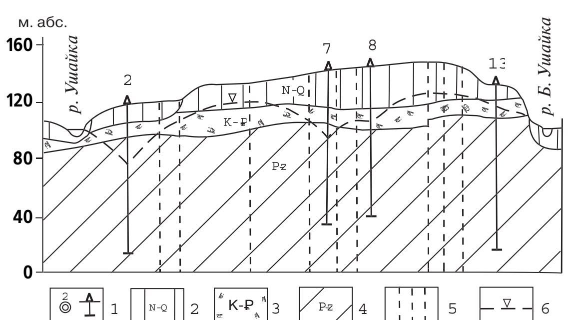


Рис. 1. *Расположение эксплуатационных скважин водозабора Академгородка и схема гидрогеологического строения месторождения (по материалам В.Л. Карлсона): 1) скважина и ее номер; 2) комплекс неоген-четвертичных отложений; 3) водоносный горизонт палеозойских образований; 4) глинистая кора выветривания; 5) тектонические нарушения; 6) уровень подземных вод*

Химический состав подземных вод

По химическому составу воды эксплуатационных скважин исключительно гидрокарбонатные с различными взаимоотношениями кальция и магния, пресные, нейтральные и слабощелочные, жесткие и умеренно-жесткие (таблица).

Преобладающим катионом является кальций, реже – магний. В целом подземные воды являются типичными представителями вод таежных и подтаежных ландшафтов Колывань-Томской складчатой зоны. Вариации значений показателей химического состава, закономерности и масштабы их изменений зависят от пространственного положения, литолого-фациальной принадлежности пород и генетического типа вод, а также временной координаты отбора проб. Анализ изменчивости химического состава позволяет выделить три группы эксплуатационных скважин.

Первая группа скважин эксплуатирует собственно подземные воды разрывных нарушений и их обрамления и, в меньшей мере, воды зоны интенсивной трещиноватости. Это наиболее высокоминерализованные воды с повышенным содержанием углекислоты, железа и марганца и жесткостью, как правило, превышающей допустимые нормы.

Вторая группа скважин характеризуется минимальными значениями минерализации и жесткости подаваемой воды, но в воде в подавляющем числе случаев присутствуют, хотя и в не превышающих ПДК количествах, загрязнители, типичные для вод поверхностных водотоков. О высокой вероятности привлечения поверхностных вод говорили ранее авторы отчетов по разведочным работам.

Третья группа скважин по гидрохимическим характеристикам занимает промежуточное положение между двумя первыми, что дает основание предполагать принадлежность подземных вод к коллекторам зоны региональной трещиноватости.

Значения, превышающие предельно допустимые для вод хозяйственно-питьевого назначения, имеют содержания железа и марганца, окисляемость и жесткость, причем железо и марганец практически в ста процентах случаев, а жесткость и окисляемость – лишь в отдельных скважинах, а иногда и только в определенные периоды.

Изменение гидрогеохимических показателей в процессе эксплуатации месторождения

Эксплуатация скважин водозабора вызвала формирование единой воронки депрессии, имеющей замкнутый вид и занимающей площадь 2...2,5 км^2. Распространение воронки ограничивается водоразделом на юге, контурами рек на севере (р. Ушайкой) и востоке (р. Большой Ушайкой), руч. Куташевским на западе. В отдельных, наиболее интенсивно эксплуатируемых, скважинах понижение уровня достигало 17...23 м (скв. 2, 6).

Изменение гидродинамических условий, по нашему мнению, приводит к аэрации недр – ведущей причине, практически монопольно определяющей в данных ландшафтных условиях изменение природного состояния системы "вода-порода" и активизацию физико-химических процессов, а в конечном итоге – трансформацию гидрогеохимических параметров и качества вод.

Аэрирование горизонта сопровождается переходом железа из раствора в твердую фазу и, на наш взгляд, фиксируется на данном месторождении уменьшением содержаний железа в водах эксплуатационных скважин. Это хорошо иллюстрируется графиком, приведенным на рис. 2. Переход железа из раствора в твердую фазу сопровождается выделением углекислоты или ионов водорода, повышающих кислотность среды и, соответственно, увеличивающих растворимость карбонатов. В этой связи, именно аэрация недр является главной и практически во всех природных условиях распростра-

Таблица. *Химический состав подземных вод и вод технологического цикла водозабора Академгородка (составлено по данным служб водозабора за 1973—2001 гг.)*

Показатели	Воды эксплуатационных скважин	Воды технологического цикла		
		поступающие на технологический цикл	прошедшие технологический цикл	изменчивость параметров
Температура, °С	5,0...8,5 7,98	5,0...15,0 6,88	6...13 8,93	−1...6 2,27
Сухой остаток, мг/дм^3	307...607 396,0	300...531 348,8	280...700 326,7	−170...180 −23,9
pH	6,96...7,73 7,35	6,7...8,8 7,62	6,5...8,6 7,63	−0,6...0,5 0,02
Жесткость, мг-экв /дм^3	5,5...8,35 6,76	3,7...8,0 6,66	4,0...8,2 6,54	−1,72...0,7 −0,17
HCO_3^-, мг/дм^3	366...469,7 425,2	366...525 421,5	366...488 414,2	−109,8...42,7 −6,7
Cl^-, мг/дм^3	0,5...12,8 3,6	0,47...12,5 3,70	0,57...11,5 4,17	−3,9...4,0 0,39
SO_4^{2-}, мг/дм^3	0,1...71,1 2,36	0,1...61,07 2,0	0,1...43,04 1,50	−18,93...0,0 −0,5
Ca^{2+}, мг/дм^3	80...142 104,2	52...130 99,6	55...132 98,4	−16...24 −1,2
Mg^{2+}, мг/дм^3	8,5...28,7 19,2	2,4...48,2 18,3	0,9...45,1 17,9	−12,2...30,5 −0,7
NO_3^-, мг/ дм^3	0,005...4,4 0,50	0,0005...1,11 0,22	0,0005...6,5 0,84	−0,5...6,0 0,62
NO_2^-, мг/дм^3	0,01...0,075 0,083	0,001...0,6 0,02	0,0001...0,12 0,045	−0,48...0,02 0,02
NH_4^+, мг/дм^3	0,16...1,85 0,82	0,001...1,0 0,346	0,0...0,5 0,045	−1,0...0,05 −0,30
$Fe_{общ}$, мг/дм^3	0,93...16,80 4,03	0,36...12,0 3,49	0,005...0,2 0,043	−7,85...(−0,29) −3,30
Mn, мг/дм^3	0,17...1,94 0,94	0,001...1,0 0,52	0,0001...0,12 0,045	−0,99...0,27 −0,46
Cu, мг/дм^3	0,0005...0,02 0,003	0,002...0,1 0,01	0,002...0,02 0,0098	−0,005...0,01 0,00025
Mo, мг/дм^3	0,0005...0,002 0,0084	0,0001...0,02 0,00277	0,0001...0,02 0,00270	−0,005...0,002 0,00007
O_2, мг/дм^3	–	0,23...11,0 4,32	2,08...19,6 10,00	−3,0...18,4 5,82
CO_2 св., мг/дм^3	10,5...95,2 40,5	2,0...123,2 33,26	1,0...90,2 24,16	−55,0...52,8 −9,11
Окисляемость, мг O_2/дм^3	0,7...3,6 1,70	0,53...6,5 2,14	0,64...5,44 1,76	−2,24...2,4 −0,298
Количество определений	44	67		

Примечание. В числителе приведен диапазон, в знаменателе — средние значения показателей

ненной причиной, определяющей внутрипородное осаждение соединений железа и повышающей общую жесткость и минерализацию эксплуатируемых подземных вод.

Эксплуатация Академического месторождения подземных вод, водовмещающие породы которого, как и палеозойских образований региона в целом, пиритизированы, активизирует и окисление сульфидов в зоне аэрации и водосодержащей толще [1]. В результате в водах эксплуатационных скважин четко фиксируется рост содержаний сульфат-иона во времени. В конце 80-х годов прошлого столетия среднее содержание сульфат-иона в водах эксплуатационных скважин составляло 5,1, а в конце 90-х – уже 27,6 мг/дм^3, т.е. в течение десятилетия возрастало со средней интенсивностью приблизительно 2,0 мг/дм^3 в год. Эта закономерность наиболее ярко видна по отдельным активно эксплуатируемым скважинам, имеющим максимальные понижения уровня и, соответственно, объемы искусственно аэрируемой части водоносного горизонта (скв. 2, 6). За 15 лет эксплуатации содержание сульфат-иона в них изменилось от первоначально полного отсутствия (ниже чувствительности методов определения) до 60...70 мг/дм^3 в последние годы. Таким образом, интенсивность роста содержания сульфат-иона в водах этих скважин в 2...3 раза выше средней. Окисление сульфидов сопровождается подкислением вод, которое тут же расходуется на повышение растворимости карбонатных минералов. Появление же в составе вод более высоких концентраций сульфат-иона, в свою очередь, активизирует образование комплексных соединений, чем повышает и усиливает миграционную способность элементов. Поэтому воды, формирующиеся в этих условиях, способны содержать большие количества элементов, в том числе таких, например, как кальций и магний. В этой связи, наряду с сульфат-ионом в водах эксплуатационных скважин, наблюдается повышение величин общей жесткости и минерализации. Эта закономерность хорошо проявляется при сопоставлении средних значений

жесткости, относящихся к различным периодам освоения месторождения. Так, например, средняя жесткость подземных вод поисково-разведочных скважин до начала работы водозабора составляла 5,8, в эксплуатационных скважинах в конце 80-х гг. XX в. – 6,2, в конце 90-х гг. – 6,9 мг-экв/дм³.

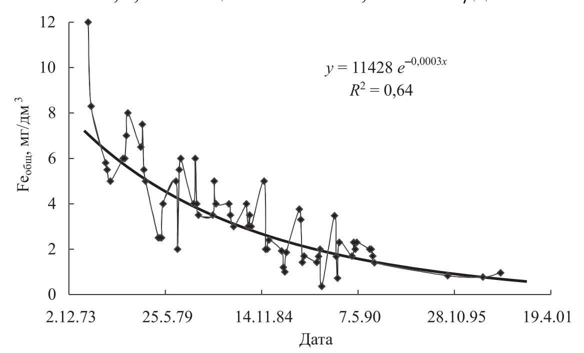
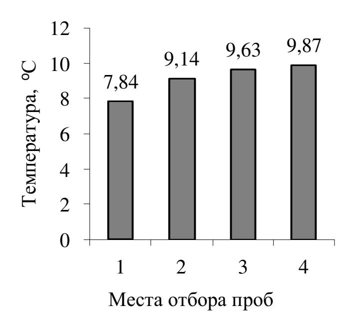


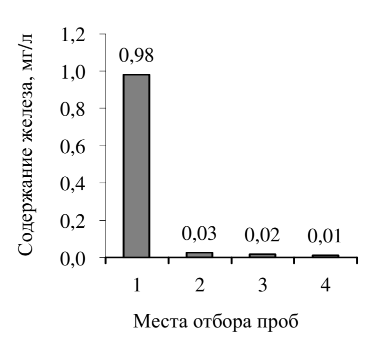
Рис. 2. *Изменение содержаний железа в водах, поступающих на технологический цикл, при эксплуатации водозабора*

Именно эти процессы в некоторых случаях и, в частности, на описываемом Академическом месторождении могут играть гораздо более существенную роль в повышении содержания сульфат-иона в водах, чем традиционно используемые для объяснения этого явления процессы привлечения поверхностных вод при эксплуатации скважин, работающих в инфильтрационном режиме. Простейшие расчеты показывают, что для обеспечения возможности загрязнения подземных вод Академического месторождения за счет вод р. Ушайки в последних необходимы содержания сульфат-иона, составляющие несколько сотен мг/л чего нет в реальных условиях.

Изменение гидрогеохимических показателей в технологических процессах водозабора

Принятая на водозаборе схема подготовки воды предусматривает ее обезжелезивание аэрацией на вентиляторной градирне с последующим прохождением через фильтрующую загрузку и хлорирование. В процессе технологического цикла водоподготовки изменяются термодинамические условия (температура, давление, газовый режим). В частности, наблюдается повышение температуры практически в 100 % случаев, в среднем на 2,3 °С, максимально на 6 °С, идет обогащение кислородом (практически в 100 % случаев, в среднем на 5,82, максимально – на 18,4 мг/дм³). В то же время происходит потеря углекислого газа в среднем на 9,1, максимально – на 55 мг/дм³. Происходящие изменения указанных параметров смещают равновесие в ту или иную сторону, вызывая последующие изменения других показателей (таблица). Основные компоненты (Fe, Mn), на которые ориентирован технологический процесс, удаляются в 100 % случаев до концентраций, не превышающих нормативных требований. Вместе с тем, обращает на себя внимание, что при водоподготовке, имеющей целью, главным образом, удаление железа и марганца, примерно в 60...80 % случаев наблюдается снижение солесодержания. Величина сухого остатка уменьшается в среднем на 23,9, максимально на 170, гидрокарбонат-иона – в среднем на 6,7, максимально на 109,8, кальция – в среднем на 1,2, максимально на 16, магния – в среднем на 0,7, максимально на 12,2 мг/дм³. Наряду с основными компонентами солевого состава наблюдается уменьшение окисляемости (в 80 % случаев), содержаний молибдена (в 70 % случаев), меди (в 50 % случаев). В то же время, в отдельные периоды (примерно, в 10...20 % случаев) наблюдается повышение содержаний компонентов, а иногда (примерно в 5...10 % случаев) – отсутствие изменений. Все это свидетельствует о сложных процессах, происходящих как непосредственно в водной среде, так и в системе вода – фильтр, а именно, о том, что на фильтрах возможно как выпадение вновь формирующихся минералов, так и растворение ранее сформировавшихся. Таким образом, фильтры могут играть роль геохимического барьера, быть нейтральными к проходящим водам, а иногда являться источниками элементов в воде.





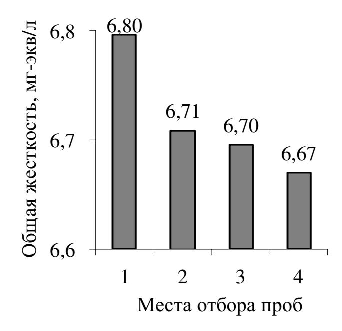


Рис. 3. *Изменение параметров гидрогеохимических сред водозабора Академгородка. Места отбора проб воды: 1) до технологического цикла водоподготовки; 2) после технологического цикла водоподготовки; 3, 4) в сетях: 3) в корпусе института; 4) в жилом доме*

Последующая транспортировка воды потребителю, как и водоподготовка, сопровождается дальнейшим изменением термодинамических параметров, в частности увеличением температуры, и соответственно изменением состава воды, уменьшением величины общей минерализации и общей жесткости, содержаний железа, кальция, гидрокарбонат-иона и других компонентов. На рис. 3, где показаны величины однопериодных средних значений температуры, содержаний железа и величины общей жесткости на разных этапах технологического процесса, хорошо видны и изменения, происходящие и в водоразборной сети.

Изменение химического состава воды сопровождается вторичным минералообразованием и формированием осадков на технологическом оборудовании водозаборных и очистных сооружений, в водоразводящей сети. По результатам расчетов термодинамических равновесий в системах подземная вода – алюмосиликаты и подземная вода – карбонаты, воды месторождения насыщены относительно кальцита, арагонита, сидерита, родохрозита, церуссита, малахита, кварца; равновесны с продуктами выветривания первичных алюмосиликатов (каолинитом, иллитами, монтмориллонитами). Результаты расчетов хорошо согласуются с результатами выполненных нами исследований минералогического состава осадков на фильтрах водозаборных скважин и фильтрах обезжелезивания. Осадки сложены преимущественно гидроксидами железа и марганца и карбонатами кальция, железистая фаза представлена ферригидритом и гематитом [2, 3].

Основные выводы

Проведенные исследования по изучению влияния эксплуатации месторождения подземных вод показали, что произошедшие за 20–30-летний период изменения гидродинамических условий, вызванные водоотбором и приводящие к формированию депрессионных воронок, сопровождаются трансформацией термодинамического состояния в системе вода – порода и, соответственно, гидрогеохимическими преобразованиями, выражающимися в изменении миграционной способности химических элементов, а в конечном итоге и качества вод. Особенности проявления таких воздействий, по нашему мнению, определяются, главным образом, общей ландшафтной спецификой соответствующих территорий. В типичных южно-таежных ландшафтах водоотбор сопровождается аэрированием недр зоны депрессионной воронки и горизонта, последующим сдерживанием миграционной способности железа, уменьшением содержаний в водах и выпадением его еще в пластовых условиях. Переход железа из раствора в твердую фазу сопровождается выделением углекислоты или ионов водорода, повышающих кислотность среды и, соответственно, увеличивающих растворимость карбонатов. Как следствие, это приводит к повышению общей жесткости и минерализации отбираемых подземных вод. Более того, эксплуатация месторождений подземных вод, водовмещающие породы которых пиритизированы, активизирует окисление сульфидов в зоне аэрации и водосодержащей толще. Окисление сульфидов сопровождается подкислением вод, которое тут же расходуется на повышение растворимости карбонатных минералов и увеличение содержания сульфат-иона. Появление же в составе вод более высоких концентраций сульфат-иона, в свою очередь, активизирует образование комплексных соединений, чем повышает и усиливает миграционную способность элементов. Поэтому воды, формирующиеся в этих условиях, способны содержать большие количества элементов, в том числе таких, например, как кальций и магний, что также способствует повышению величин общей жесткости и минерализации.

Описанные механизмы изменений гидрогеохимических условий с пространственных позиций носят широкий площадной характер. В то же время, поступление загрязнителей с поверхности, если даже и имеет место, то, на наш взгляд, является пространственно ограниченным и эпизодическим.

Общая ландшафтная специфика территорий проявляется и последующих трансформациях гидрогеохимических показателей в технологическом процессе водоподготовки и в водоразборных сетях.

В целом же, изменения гидрогеохимических показателей, вызванные эксплуатацией, не носят запредельный, выше нормативного, характер и не выходят за типоопределяющие границы, характерные для тех или иных региональных условий. Однако, возможные изменения химического состава с практической точки зрения должны учитываться как на стадиях оценки эксплуатационных запасов, так и при обосновании технологий водоподготовки, в связи с тем, что длительная эксплуатация может привести к необходимости пересмотра технологических схем.

На всех этапах добычи воды и ее подготовки значительная часть химических элементов выводится из водной миграции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобразования РФ (проект № 07.01.389); Минпромнауки, грант № НШ-1566.2003.05.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dutova E.M., Nalivaiko N.G., Kuzevanov K.I., Kopylova J.G. The chemical and microbiological composition of urban groundwater, Tomsk, Russia // Proc. of the XXVII[th] Congress IAH. – Nottingham, UK, 1998. – V. 2. – P. 371–376.
2. Покровский Д.С., Дутова Е.М., Рогов Г.М., Вологдина И.В., Тайлашев А.С., Лычагин Д.В. Минеральные новообразования на водозаборах Томской области / Под ред. Д.С. Покровского. – Томск: Изд-во НТЛ, 2002. – 176 с.: ил.
3. Покровский Д.С., Дутова Е.М., Вологдина И.В., Тайлашев А.С. Природно-техногенное минералообразование на фильтрах обезжелезивания водозабора Томского Академгородка // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 6. – С. 319–329.